Probleme formaler Modelle in den historischen Wissenschaften

Gordesch, Johannes

Veröffentlichungsversion / Published Version
Sammelwerksbeitrag / collection article

Probleme formaler Modelle in den historischen Wissenschaften

von Johannes Gordesch

1 Modelltechniken in den historischen Wissenschaften

Das Studium vereinfachter, aber streng gefaßter Strukturen spielt in den zeitgenössischen Formen von Sozial- und Geisteswissenschaften eine hervorragende Rolle. In den historischen Disziplinen wurde mit dem Aufkommen der Strukturgeschichte im Gegensatz zur vormals vorherrschenden Ereignisgeschichte der Boden bereitet für ein Denken in Modellen, in "simplified skeletal systems" (BEACH 1957). Theorien lassen sich dann von Modellen bestenfalls durch einen größeren Anwendungsbereich oder eine differenziertere Ausarbeitung unterscheiden.

Damit begibt sich die Wissenschaft in deutlichen Gegensatz zum Vorrang einer allumfassenden, überdauernden Theorie, die sich oftmals zu einer Heilslehre entwickelt. Dieses Vorgehen konnte nicht ohne Widerspruch bleiben. Bisweilen suchte und sucht man polemisch eine Verbindung zu nationalen oder politischen Denkstilen: Den Deutschen oder den Russen (principialnost') wird eher der Hang zur großen Theorie zugeschrieben, den pragmatischen Angelsachsen oder den Vertretern einer oberflächlichen, allerlei wirtschaftlichen oder politischen Interessen unterworfenen Konsumhaltung die Betonung unverbindlicher, kurzfristig genutzter Modelle. Anderen ist wiederum der große Geist abhanden gekommen (man setze eine an der Kunst der Griechen und Römer orientierte Archäologie gegen eine heutige Archäometrie!). Wie die Argumente auch immer lauten, Zeitgeist und praktische Bewährung haben ihr Urteil gesprochen.

Besonders schön läßt sich der Modellbegriff an der modernen Archäologie demonstrieren. Modell (im Maßstab 1:1) ist zunächst Schauplatz der experimentellen Archäologie, wo die materielle Kultur (Herstellung von Gerätschaften, Bau von Wohnstätten, Gewinnung von Erzen, Bewältigung des Nahrungsmittelproblems) im Mittelpunkt der Betrachtung stehen. Modell ist hingegen weitaus häufiger Denkmodell. Im einfachsten Fall besteht so ein Modell nur aus zwei (Streudiagramm, Scatter Plot) oder drei Variablen

(Trend Surface Analysis, wo zwei Variablen wie üblich im Diagramm, die dritte als Kote oder Niveaulinie wie bei Landkarten auftreten). Diese Beziehungen werden durch eine Regressionsgleichung algebraisch beschrieben (z.B. die klassische lineare Regression mit ein oder zwei unabhängigen Variablen; vgl. HODDER und ORTON 1976). Das andere Extrem stellen die großen ökonometrischen Modelle mit mehreren tausend Variablen dar. Die Modelle der historischen Sozialforschung können für mathematische Modelle in den Geschichtswissenschaften als typisch angesehen werden: Sie gehen so gut wie nie über zwanzig oder dreißig Variablen hinaus.

2 Statistisches Modellieren

Erstaunlicherweise tritt an die Seite der diffizilen realwissenschaftlichen Arbeit häufig eine völlig unreflektierte statistische Methodik: Bald suchen Realwissenschaftler durch die Kenntnis möglichst vieler statistischer Tests ihre Hypothesenprüfung zu unterstützen (der klassische Fall) oder (die neuere Mode) durch den Einsatz immer weiterer statistischer Programmpakete zu imponieren. Damit gehen aber die Vorzüge der statistischen Methodik, nämlich der Gewinn an Sicherheit und Präzision, verloren. Schon bei den einfachsten statistischen Tests steht ja ein mathematisches Modell dahinter, z. B. bei der Varianzanalyse die Beschreibung realwissenschaftlicher Sachverhalte durch Mittelwerte (die eine starke Informationsreduktion bewirken) und deren Veränderlichkeit (gemessen durch die Varianz). Das ist mehr als bloß die stochastische Voraussetzung der Normalverteilung (einer Verteilung, die durch die ersten zwei Momente bestimmt ist); auch unabhängig von einer statistischen Betrachtung wird ein bestimmter funktionaler Zusammenhang angenommen, der dem Sachverhalt entsprechen kann oder nicht.

Nun hat sich die statistische Mode geändert (wenn man will, es hat sich ein Paradigmenwechsel vollzogen): Die Korrelationsrechnung (Besteht ein signifikanter Zusammenhang?) wurde durch die Regressionsrechnung (Wie berechne ich eine Größe aus anderen?) abgelöst, desgleichen ein Wechsel von bivariaten Fragestellungen zu multivariaten vollzogen. Der klassische Einsatz statistischer Tests erfolgte im Sinne der Korrelationsrechnung zur Prüfung von Zusammenhängen und ist somit ebenfalls im Rückgang. Beim Regressionsmodell ist natürlich die Frage nach der Stichprobenabhängigkeit der Koeffizienten ebenso sinnvoll (Wie ändern sich die Koeffizienten in den Gleichungen bei einer Wiederholung der Untersuchung?). Die Modelle sind zumeist lineare Modelle, da sie statistisch wie numerisch wesentlich leichter zu handhaben sind als nichtlineare. Die leistungsfähigen und preisgünstigen Computer mit der benutzerfreundlichen Software ermöglichen einem großen Benutzerkreis, hochgezüchtete statistische Modelle einzusetzen. Der Fortschritt gegenüber der blinden Testfreudigkeit ist trotzdem gering, weil für gewöhnlich die Adäquatheit der jeweiligen statistischen Modelle nicht überprüft wird. Die Ursachen liegen zum Teil in schlichter Unwissenheit, zum Teil darin, daß die Tests innerhalb der heutigen komplexen Modelle oftmals nicht bekannt oder von geringer Entscheidungsfähigkeit sind.

Es ist unbedingt vonnöten, bereits bei der Erstellung des realwissenschaftlichen Modells formalwissenschaftliche Vorstellungen einzuarbeiten, wie dies seit langem in den physikalischen Wissenschaften Standard ist. "Formalwissenschaftlich" bedeutet in erster Linie "mathematisch", wie in der Physik auch, in zweiter Linie "statistisch", wenn die Anpassung an die Daten vollzogen wird. Die Physiker nehmen den statistischen Teil recht leicht, können vielleicht dies bei ihren Daten auch tun, legen aber größtes Augenmerk auf die Formulierung mathematischer Modelle und deren (noch theoretische, das heißt vor der Anpassung an die Daten erfolgende) Interpretation. In den Sozialwissenschaften hat eine verstärkte Hinwendung zu (statistischen) Modellierungstechniken mit Lazarsfeld, Blalock, Boudon, Coleman vor mehreren Jahrzehnten eingesetzt, oftmals unter dem Titel "kausale Modelle". Die speziellen statistischen Modelle mögen heute als veraltet gelten, das Prinzipielle ist geblieben. Die historischen Wissenschaften sind in ihrer breiten Masse leider nur selten diesem Weg gefolgt, wenngleich es namentlich im angelsächsischen Kulturbereich herausragende Beispiele gibt.

Wenigstens sollte jedoch eine wohlüberlegte Vorentscheidung nach folgenden Gesichtspunkten geschehen: Kausalität, Finalität, Werturteile; Stichprobe und Grundgesamtheit; Automat (Systeme mit Eingabe, Ausgabe und beschreibenden Zuständen), Boolesche Funktionen (qualitative Modelle, z.B. Entscheidungstabellen) und andere mathematische Modelle; Linearität, Nichtlinearität, Zeitabhängigkeit (Prozesse).

3 Modellbegriff

Ein Modell umfaßt - wie etwa von TINBERGEN und BOS (1962) für die Wirtschaftswissenschaften konzipiert - folgende Teile:

(1) Eine Liste von Variablen (das heißt von Faktoren, die das Geschehen beschreiben können).

(2) Eine Aufgliederung der Variablen in zunächst zwei Gruppen, nämlich in bekannte und in erst zu berechnende Größen, oder in exogene und endogene Variablen.

(3) Eine Liste von Relationen oder spezieller von Gleichungen, welche die Beziehungen zwischen den einzelnen Variablen festlegen. Die Relationen oder Gleichungen werden je nach ihrer Funktion (Definitionen, Beziehungen in besonderen Subsystemen und dergleichen) untergliedert.

(4) Bestimmende Konstanten ("Parameter"), welche das zunächst noch recht allgemeine Modell dem realen Einzelfall anpassen.

4 Meßproblematik

Von größter Bedeutung ist es, daß in keiner Wissenschaft Messen ohne Bezug auf einen speziellen Kontext (Modell, Operationalisierung) und ohne normative Festlegungen (wie das Anforderungsniveau) erfolgen kann. In den historischen Wissenschaften vereinen sich naturwissenschaftliche Methoden (beispielsweise in der Archäometrie) mit geisteswissenschaftlichen. Daher sei im folgenden eine Synthese zwischen sozialwissenschaftlicher und naturwissenschaftlicher Meßtheorie versucht und darin die wesentlichen Meßprobleme aufgezeigt. Zur Illustration denke man etwa an so gegensätzliche Beispiele wie die Vermessung von Grundrissen oder die Entwicklung von Getreidepreisen.

Messen heißt, den unbekannten Wert einer exogenen Variablen des Modells auf empirische Weise zu ermitteln. Dies geschieht stets durch einen Vergleich mit der Einheit der betreffenden Größenart, die alleine innerhalb des Kontexts eines Modells und durch eine operationale Definition bestimmt ist.

Die Operationalisierung der Begriffe und Hypothesen entspricht dabei dem Meßprinzip in der naturwissenschaftlichen Metrologie. Die Meßmethode gibt Auskunft darüber, wie der Vergleich mit der Einheit durchgeführt wird. Im allgemeinen wird es sich im sozial- und geisteswissenschaftlichen Bereich um die Differenzenmethode (wieviel mehr als der Ausgangswert?) handeln, so daß der Begriff "Meßmethode" aus der Metrologie unergiebig wird. Man kann daher in den historischen Wissenschaften die Begriffe des Meßprinzips und des Meßverfahrens (Meßprinzip plus Meßmethode) zusammenfallen lassen.

Die Schwierigkeiten liegen einmal in einer geeigneten Operationalisierung, zum anderen jedoch in der oft nicht einmal als Problem erkannten "Kalibrierung" oder des "Einmessens", sowie der Eichung. Die Kalibrierung wird in Psychologie und Soziologie für gewöhnlich "Skalierung" genannt. Skalierung setzt ein bestimmtes, auszuwählendes Skalierungsverfahren voraus, das nicht ohne weitreichende Annahmen über die zugrundeliegende Wirklichkeit auskommen kann. Eichung ist eine normative Feststellung, daß das Meßmittel den vorgeschriebenen Anforderungen entspricht (z.B. Validität und Reliabilität). Die Eichung muß von Fall zu Fall und bei Vorliegen besonderer Umstände wiederholt werden.

Ein besonderes Problem stellt die Robustheit der Modelle dar, das heißt, wie weit sich ein Modell bei geringfügigen Änderungen in den Daten selbst ändert.

Der durch die Messung in das Modell gebrachten Unsicherheit wird innerhalb des Modelles durch die statistischen Verfahren zu begegnen gesucht. Die Ansätze reichen dabei von der klassischen Fehler- und Ausgleichsrechnung (Gauß, Laplace, Legendre) bis zu den heute üblichen Schätzverfahren der mathematischen Statistik. Die Grundfragen sind dieselben geblieben: überschüssige Beobachtungen (mehr Beobachtungen als zu schätzende Parameter), regelmäßige (systematische) und zufällige "Fehler" (Abweichungen vom Modellwert), Begriff der Meßgenauigkeit (Streuungsmaße), Fehlerfortpflanzung (Bestimmung des Fehlers einer Funktion, wenn die Fehler der einzelnen Variablen bekannt sind).

In der sozialwissenschaftlichen Meßtheorie und in der Praxis der Auswahl statistischer Verfahren spielt seit langem das Skalenniveau (metrische, ordinale, qualitative Skalen) eine bedeutsame Rolle, während in den Naturwissenschaften die metrischen Skalen vorherrschen und eine Anwendung schwächerer Meßniveaus kaum interessant erscheint. Jedes statistische Modell muß jedoch mehr (z. B. LISREL) oder weniger (normalverteilte Meßdaten, kein besonderes Meßmodell) das Meßproblem berücksichtigen.

5 Kausale Modelle

Kausales Denken gilt oft als die wissenschaftliche Denkform schlechtweg. Legt man den Werkzeugcharakter des Denkens zugrunde, so muß sich Kausalität als Denkform im Erkenntnisprozeß bewähren, was gerade im geschichtswissenschaftlichen Bereich nicht immer der Fall zu sein scheint.

Kausalität ist einmal Ziel-Mittel-Denken (technischer Kausalitätsbegriff), dann aber auch ein Interpretationsbegriff wie Zufall und Notwendigkeit (historischer Kausalitätsbegriff).

Kausalität stellt eine lineare Ordnung von Ereignissen (eine "Kette") dar. Dies ist der formal faßbare Aspekt; in der Ordnung liegt noch eine Art von "Notwendigkeit". Bereits allgemeiner ist der Begriff der partiellen Ordnung von Ereignissen (partially ordered sets, "posets"). Einzelne partiell geordnete Ereignismengen bilden einen Verband (z. B. Mengenverband). Andere Ereignisverbindungen stellen kybernetische Systeme dar (Regelkreise, Automaten). Der einfachen Ereignisordnung der Kausalität entspricht ein funktionaler Zusammenhang ("Causal Chains", WOLD 1954) der Art

$y = Ax$,
$x = (x_1 \dots x_n)$ Ursachen, $y = (y_1 \dots y_m)$, Wirkungen,
A eine untere Dreiecksmatrix.

Weitergehende Formalisierungen wurden von verschiedenen Seiten vorgeschlagen (MALINVAUD 1964; GORDESCH 1972).

Nun ist jede Denkform nur in einem bestimmten Erfahrungsbereich gültig, eine Übertragung auf einen umfassenderen Bereich nicht mehr zulässig. Klassische Beispiele sind der Begriff der Bewegung in der griechischen Philosophie: Jede Bewegung setzt eine andere Bewegung voraus, bis schließlich der "unbewegte Beweger" einen ersten Anfang setzt. Das ist aber ein Widerspruch, oder heißt nur, daß das Bewegungsprinzip lediglich in einem eingeschränkten Bereich gültig ist. Ebenso wird allgemein Kausalität nur in einem bestimmten Erkenntnisbereich sinnvoll verwendet. Akausalität bedeutet dann allerdings nicht Ursachenlosigkeit, sondern nur die Nichtanwendbarkeit der Denkkategorie Kausalität.

So ist der Funke des Feuersteins die physikalische Ursache der Entzündung des Pulvers in einer Muskete. Es ist aber nicht mehr oder zumindest nicht ohne eingehende Prüfung aussagbar, ob die Entwicklung der Astronomie, Kartographie und dergleichen im 16. Jahrhundert Schiffahrt und Seehandel gefördert hat, oder Schiffahrt und Seehandel die Wissenschaft. (Die umgekehrte Erklärungsrichtung müßte ausdrücklich falsifiziert werden). Kausalität ist somit keine globale Eigenschaft einer Ereignismenge, sondern eine lokale, das heißt, eine Beziehung, die genügend genau bestimmten Einzelereignissen zukommen kann. Solche in einer Kausalitätsbeziehung stehenden Ereignisse können dann zu größeren Systemen wie Regelkreisen (Rückkopplung!), Automaten und dergleichen zusammengefügt werden. Diese übergeordneten Systeme sind realwissenschaftlich (also historisch) genau so wirklich oder unwirklich (reine Denkformen) wie die Kausalität, jedoch für einen größeren Bereich von Erscheinungen anwendbar. Fehlt diese Präzisierung, so werden die gemachten Behauptungen weder wahr noch falsch; sie stellen keine Aussagen (im Sinne der Logik) dar, sondern bestenfalls Aussageformen, die noch die Möglichkeit besitzen, zu Aussagen zu werden.

Wie bei der Prognose sucht man dem Problem der nicht immer mit Sicherheit feststellbaren Kausalbeziehung in altbewährter Weise durch eine Stochastisierung Herr zu werden. Man spricht dann nicht mehr davon, daß "A die Ursache der Wirkung B" sei, sondern nur noch davon, daß "mit der Wahrscheinlichkeit p A als die Ursache von B" angesehen werden könne (vgl. dazu SUPPES 1970). Dieser Ansatz läßt sich nochmals verallgemeinern, indem man den Wahrscheinlichkeitsbegriff durch den inhaltlich unbestimmteren, jedoch weiterreichenden Begriff der Fuzzyness ersetzt (Die Fuzzy Set-Theorie ersetzt im großen und ganzen den additiven Mengenverband in der Definition der Wahrscheinlichkeit durch einen subadditiven: Die Wahrscheinlichkeit der Oderverbindung zweier sich ausschließender Ereignisse ist nicht mehr gleich der Summe der Einzelwahrscheinlichkeiten, sondern kleiner oder gleich dieser Summe).

Das Denken in Modellen kommt einerseits dem kausalen Denken entgegen, da es sich auf einen recht kleinen Erfahrungsbereich beschränken läßt, was aber das Denken in größeren Systemen natürlich nicht ausschließt. Die mathematische Formulierung von Kausalität führt jedoch zu größten Schwierigkeiten, da eigentlich immer nur eine funktionale Beziehung zwischen Ursachen und Wirkungen sowie eine Ordnungsbeziehung (die Ursache kommt vor der Wirkung) erfaßt werden. Was aber diese sonderbare "Notwendigkeit" des Vorher-Nachher ausmacht, entgleitet weitgehend. So verfallen eigentlich alle, noch so kunstvoll ausgebildeten kausalen Modelle dem klassischen Fehlschluß des "post hoc, ergo propter hoc".

Diesem Dilemma entkommt man bei der Modellbildung nur, indem man entweder auf das kausale Denken verzichtet und beispielsweise in vernetzten Systemen denkt, oder indem man von außerhalb des Modelles weiß, welche Beziehung eine kausale und welche eine rein funktionale ist. Woher aber dieses Wissen außerhalb des schon genügend Schwierigkeiten bereitenden Modelles kommt, bleibt offen.

Abschließend sei noch auf die Problematik des Kausalitätsbegriffes bei nichtlinearen Modellen hingewiesen, wo das "schwache Kausalitätsprinzip" (gleiche Ursachen, gleiche Wirkungen) durch das "starke Kausalitätsprinzip" (ähnliche Ursachen, ähnliche Wirkungen) ersetzt werden muß, wenn es überhaupt noch anwendbar sein soll (vgl. die Abschnitte 12 und 13).

5.1 Stufen des Modellbaus

Der Aufbau eines kausalen Modells erfolgt in folgenden Schritten:

(1) Phänomenologische (Verbale) Analyse

(2) Aufstellen der Zusammenhangsmatrix bzw. des Zusammenhangsgraphen

(3) Bewertung des Graphen (z. B. durch Korrelationskoeffizienten oder Kovarianzen)

(4) Aufstellen des linearen Gleichungssystems

(5) Elimination überflüssiger Variablen und Relationen

(6) Prüfung des linearen Gleichungssystemes auf Identifziertheit und Überbestimmtheit

(7) Treffen der für die Identifikation nötigen Annahmen

(8) Bestimmung der Parameter des Modells, zumeist durch statistische Schätzverfahren oder auch nur einfache Ausgleichung

(9) Überprüfung der Güte des Modells durch Rückeinsetzen und statistische Tests

(10) Modifikation des Modells (z. B. Ausscheiden von Variablen mit zu kleinen Koeffizienten)

(11) Wiederholung ab Schritt (6), bis eine genügend gute Anpassung erreicht ist

(12) Gegebenenfalls Normierung der Koeffizienten des linearen Gleichungssystems

6 Normative Aspekte

Unser tägliches Leben ist voll von Wertungen aller Art, aber auch tief und bisweilen unkontrolliert dringen Wertungen in die Wissenschaft ein. Man könnte F. C. Schiller zitieren: "Expellas hominem, logica, tamenusque recurret!" Es ist jedoch schwierig und bisher nicht zufriedenstellend gelöst, Werturteile (Stellungnahmen zu einem Sachverhalt im Gegensatz zur Information über einen Sachverhalt) in formale Modelle einzubauen.

Einfacher wird es, wenn Wertungen Gegenstand der Forschung sind. Normen z. B. kann man im Sinne einer deontischen Logik (vgl. VON WRIGHT 1968 und WEINBERGER 1970) als konditionale Imperative auffassen, also als Regeln der Art "'Falls die Bedingung A erfüllt ist, dann soll die Handlung B ausgeführt werden'", oder in Zeichen,

$$A \rightarrow !B.$$

Der Pfeil "→" versinnbildlicht dabei den konditionalen Imperativ, der als Vorderglied eine Aussage (Bedingung A), als Folgeglied einen Sollenssatz (!B) aufweist.

Zur Beschreibung der Normen einer Kultur oder Subkultur z. B. kann man alle in Frage kommenden kategorialen Imperative auflisten. Soweit A oder B Relations- oder Gleichungssysteme darstellen, werden die Parameter theoretisch vorgegeben (die Normen lassen sich eindeutig bestimmen) oder statistisch geschätzt (die Normen lassen sich nur mit einer gewissen Unsicherheit ermitteln). Die Normen bilden dann einen gesonderten Teil des Modells und werden von den einfachen Aussagen deutlich getrennt.

7 Sinnverstehen und Modellmethode

Der Modellansatz ist ideologisch weitaus neutraler als man gemeinhin annimmt. Selbst wenn man sich auf den extremen Standpunkt einer verstehenden Geisteswissenschaft stellt, läßt sich die Modelltechnik gebrauchen.

Verstehen ist nach der Lexikondefinition "... das Erfassen von Bedeutungen und Sinngehalten, wobei der ihnen selbst eigene Sinn-und Bedeutungsraum (Horizont), dem sie entstammen, mit in den Blick gerückt wird...". Es wird als Gegensatz zum Erklären gesehen, wobei "... das zu Erklärende nur als "Fall" begriffen und allein seine Einfügbarkeit in einen Gesamtzusammenhang hin ..." betrachtet wird (beide Zitate nach dem Kleinen Philosophischen Wörterbuch).

"Sinn" kann man in diesem Zusammenhang - in etwa BRUGGER 1976 folgend - auffassen als teleologischen Sinn (finale Betrachtung), Gestaltsinn (funktionale Betrachtung, Einordenbarkeit in ein übergeordnetes Ganzes), metaphysischen Sinn (Bedeutung größerer Ganzheiten, insbesondere des Seins, für das Leben der in dem jeweiligen Ganzen stehenden Menschen).

Verstehen in der Bedeutung des Erfassens des metaphysischen Sinns fällt wohl aus der heute üblichen Wissenschaft heraus und muß hier außer Betracht bleiben. Mit dem Erklären nach dem teleologischen Sinn und dem Gestaltsinn scheint es mir aber so zu sein wie mit der Kausalität. Sinn ist hier ebenso Interpretationsbegriff wie Kausalität. Auch hier lassen sich gewisse formale Kriterien finden. Kausale Modelle berücksichtigen nur die zeitliche Ordnung, nicht die Notwendigkeit usf. der Kausalbeziehung. Finalität weist genauso eine zeitliche Ordnung der Ereignisse auf, umfaßt aber mehr als bloß diese Ordnung (was gerade Kausalität und Finalität unterscheidet). Da der gleiche formale Aspekt in den statistischen Modellen erfaßt wird, lassen sich alle gängigen kausalen Modelle genauso gut als finale Modelle verwenden. Die Probleme bleiben haargenau dieselben, vor allem, daß der Wissenschaftler außerhalb des statistischen Modells feststellen muß, ob eine Beziehung eine kausale bzw. finale ist oder nicht. Wiederum lassen sich Schlüsse über einen engen Bereich hinaus nicht ziehen und führen rasch zu logisch widersprüchlichen Aussagen, mit denen sich dann eine dem metaphysischen Sinn gewidmete Philosophie abquält.

8 Statistisches Schließen

Wissenschaft strebt nach möglichst weitreichenden oder allgemein gültigen Aussagen. In der heutigen Statistik wird diese Aufgabe als Schluß ("statistical inference") von einer tatsächlich gezogenen Stichprobe auf eine zumeist hypothetische Gesamtheit ("one-sample problem") oder eine weitere, noch zu ziehende Stichprobe ("two-sample problem") gesehen. Die Fragen sind keineswegs geklärt und recht heikel; hier soll nur versucht werden, durch einen Blick zurück auf die Entstehung der Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik die Kernfragen zu verdeutlichen und die zwei für Historiker wichtigsten Ansätze zu skizzieren.

Die Wahrscheinlichkeitsrechnung hat ihren Ursprung in der Glücksspieltheorie, der Versicherungsmathematik des Quattrocento und - etwas später - in den Naturwissenschaften, vor allem in der Meßtheorie ("Fehlerrechnung"; vgl. HARTWIG 1968). Dem schließt sich die amtliche Statistik (Wirtschafts- und Sozialstatistik) an. Bis in unser Jahrhundert hinein waren Mathematik und Naturwissenschaft in weiten Bereichen eine Einheit; Mathematik war genauso eine Methode, zu Erkenntnissen zu gelangen, wie Beobachtung und Experiment. Würfeln war ein physikalischer Vorgang, und Wahrscheinlichkeit die Eigenschaft eines physikalischen Systems. Wahrscheinlichkeitsrechnung ("Statistik" bedeutete lange Zeit ausschließlich "amtliche Statistik") war genauso mathematisches Modellieren wie das Aufstellen der Grundgleichungen der Newtonschen Mechanik. Das Glanzstück der Wahrscheinlichkeitsrechnung war während der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts die Fehlerrechnung. Dabei herrschte die Vorstellung, daß es einen wahren Wert gäbe, aber auf Grund der Unvollkommenheiten bei der Messung es zu Abweichungen käme, weswegen die Ergebnisse in einem gewissen Widerspruch zu einander stünden (die Erdbeschleunigung z. B. könne nicht mehrere Werte zugleich annehmen) und die daher "ausgeglichen" werden müßten. Man unterschied zunächst zwischen "groben" und "unvermeidbaren" ("kleinen") Fehlern, dann noch zwischen systematischen ("regelmäßigen", d. h. immer wieder auftretenden Fehlern) und zufälligen Fehlern, die Gegenstand der Ausgleichsrechnung waren. Die Rechtfertigung für die "Ausgleichung der Fehler" lieferten Meßmodelle, die sich im Ansatz bereits 1757 bei Thomas Simpson finden und bald darauf die Spitzen der Mathematik beschäftigten (Lagrange, Daniel Bernoulli, Legendre und vor allem Gauß, aber auch zahlreiche heute mehr oder minder vergessene Mathematiker und Naturwissenschaftler). Dabei wurde anstelle des nicht erreichbaren "wahren" Wertes ein "bester" Wert errechnet. Als "bester Wert" wurden der "plausibelste", das ist der wahrscheinlichste, bzw. der "am wenigsten schädliche", das ist der eine (zumeist quadratische) Fehlerfunktion minimierende Wert angesehen. Damit waren die auch heute noch gültigen Ansätze der Maximum Likelihood-Schätzung und der Entscheidungstheorie gefunden. Etwa zur gleichen Zeit wie Simpson hatte Bayes einen völlig anderen Weg zum Meßproblem und zum statistischen Schließen beschritten, womit der letzte bedeutende Ansatz gefunden war (Bayes-Statistik). Ein gesondertes Inferenzproblem tauchte hierbei gar nicht auf, zielte ja die ganze Fehlerrechnung auf den "wahren Wert" und war obendrein Teil von Physik, Astronomie oder Geodäsie (es handelt sich allenfalls um einen Sonderfall des Induktionsproblems).

Das zwanzigste Jahrhundert brachte ein immer stärkeres Auseinanderklaffen von Mathematik und realitätsbezogener Wahrscheinlichkeitsrechnung und, wie man jetzt auch für die mathematisierte Disziplin sagte, Statistik. 1933 veröffentlichte Kolmogorov sein Axiomensystem der Wahrscheinlichkeitsrechnung, welches das für die Mathematiker so wichtige Lesbegueintegral zu verwenden gestattete und die Wahrscheinlichkeitsrechnung zu einer Teildisziplin der Analysis machte. Zwei der damals bedeutendsten Theoretiker der Wahrscheinlichkeitsrechnung, Hans Reichenbach und von Mieses, emigrierten mit dem Hochkommen des Nationalsozialismus und wandten sich in ihrer neuen Heimat völlig anderen Themen zu. Von der Statistik her gesehen, wurde Ende der Zwanziger- und Anfang der Dreißigerjahre ein Abschluß gesetzt: R.A. Fisher und Neyman und Pearson (letztere beide gingen von der statistischen Qualitätskontrolle aus) fixierten den heute klassischen Ansatz statistischen Schätzens und Schließens, so wie man ihn im Elementarunterricht lernt mit den Begriffen Fehler 1. und 2. Art, Konfidenzintervall, Hypothese und Alternativhypothese usf.

Man hatte bald die Frage nach dem "wahren Wert" als Scheinfrage fallen lassen, entweder weil man darin einen Zirkel sah, oder weil man den Schritt in die Metaphysik ablehnte. Es blieb aber die Kernfrage, nämlich die der Population. Bei der Fehlerrechnung konstruiert man gemäß dem Modell eine unendliche Population aus den als beliebig oft und ohne Änderung der Voraussetzungen wiederholbar vorausgesetzten Messungen. Die Messungen bilden eine Zufallsfolge, die in bestimmtem Sinne als konvergent angenommen wird. Nichtsdestotrotz wirken die Postulate haarsträubend: unbeschränkt oft wiederholbare Messungen (d. h. unendlich viele), dazu noch bei gleichbleibenden äußeren Bedingungen, und beliebig genaue Messungen (was schon physikalisch unmöglich ist, da längstens die Wärmebewegung der Moleküle die Zeigerablesungen unmöglich machen, im Mikrokosmos keinesfalls Stetigkeit herrscht, und die Lichtgeschwindigkeit als höchste Signalgeschwindigkeit nicht überschritten werden kann). Nicht umsonst witzelt man im Englischen über die unendlichen Zufallsfolgen: "In the long run we are all dead. "

Weniger schwerwiegend sind die Voraussetzungen in der klassischen Stichprobentheorie, wie sie in der Umfrageforschung zugrunde gelegt wird: Aus endlichen Populationen werden endliche Stichproben gezogen, so daß wenigstens die beliebig feine Meßbarkeit nicht angenommen werden muß. Die unbeschränkte Wiederholbarkeit unter sich nicht ändernden Bedingungen muß jedoch ebenfalls postuliert werden. Noch bei GEBELEIN 1943 findet sich eine solche Theorie statistischen Schließens. Später, unter dem

Einfluß einer übermächtigen Mathematik, werden zwar noch endliche Stichproben behandelt, indessen erscheinen unendliche Folgen als etwas Selbstverständliches und werden wegen der Reichhaltigkeit und Eleganz der Theorie vorgezogen. Gleichwohl tritt ein neues Problem hinzu: Bei der Fehlerrechnung war die Konstruktion der Population klar vorgegeben, bei dem üblichen Ansatz der Stichprobenerhebung ist sie es nicht:

Betrachten wir als Beispiel die Frage: "Hat der Zentralismus des römischen Reiches normierend auf das Lateinische eingewirkt?". Offenkundig ist "Latein" kein fest umrissener Begriff, und die Sprache wandelt sich im Laufe der Zeit, je nach der Region (Rom - Latium - Italien - außeritalische Provinzen), den Sprechern (oder Schreibern) und den äußeren Umständen. Leider aber ändert sich die Sprache auch mit den Quellen: Inschriften, römische Literatur, Eigennamen, Lehnwörter, Angaben der römischen Grammatiker und Lexikographen. Zum Teil sind in den Quellen Fehler enthalten (wie manche etymologische Herleitungen), die ausgeschieden werden müssen. Manche Quellen sind für statistische Verfahren weniger geeignet wie Inschriften, die wenig Sprachmaterial bieten und deren Auswahl in unkontrollierter Weise zustande gekommen ist, wenngleich ihre Zahl oft nicht gering ist (für das Faliskische z. B. stehen rund 150 Inschriften zur Verfügung; vgl. STOLZ 1966). Angaben der römischen Grammatiker muß man als Untersuchungsergebnis hinnehmen, ohne das Material dazu zu erhalten. Recht gut eignet sich die klassische römische Literatur, die man als maschinenlesbares Corpus zusammenstellen und am Rechner nach diffizilen Kriterien untersuchen kann. Doch trotz der günstigen Datenlage tauchen ohne Ende Schwierigkeiten auf: Kann man die Sprache von Plautus, Tacitus und Augustinus (vielleicht ein extremes Beispiel) zu einem "Lateinischen" zusammenfassen? Oder die Fülle der Probleme, die sich aus der Abkehr von einer normativen Linguistik ergeben - was "Sprache" ist, beginnt zu zerfließen. Die verschiedenen Definitionen oder Operationalisierungen dessen, was "Latein" ist, führen statistisch gesehen zu verschiedenen Populationen und verschiedenen Stichproben, wodurch gleichbleibende Ergebnisse nicht garantiert werden können. Dazu kommen Detailprobleme wie die der Orthographie, Unvollständigkeit und dergleichen mehr.

Wie aus dem Dilemma herausfinden? Der einfachste Ausweg besteht darin, auf den Schluß auf die Gesamtheit überhaupt zu verzichten und sich auf die beschreibende Statistik zu beschränken. Nicht von ungefähr haben die "Analyse des données" (Benzécri und andere in der frankophonen Welt) und die "Data Analysis" als moderne Formen der beschreibenden Statistik den

"Probabilisten" einiges Terrain abgewonnen. Anderseits ist die Begriffsbildung oft nur aus dem probabilistischen Kontext verständlich, und die Beschränkung auf das untersuchte Material mag im Falle einer aus den "Fehlern" konstruierten Population einer Gesamterhebung der zu untersuchenden Einzelfälle angebracht sein, läuft aber sonst den wissenschaftlichen Intentionen zuwider und ist allenfalls in einer explorativen Phase ("exploratory techniques") zu vertreten.

Ein Teil der Statistiker wird auf verschiedene Varianten der angeführten Ansätze verweisen oder weitere Methoden anführen, die im deutschen Sprachraum so wenig bekannt sind, daß ich die englischen Bezeichnungen belasse (BARNET 1973): fiducial inference (R. A. Fisher), likelihood inference, structural inference (D. A. Fraser), information-theoretical approach. Der Grundgedanke des strukturellen Ansatzes von Fraser besteht in einer Trennung von Meßmodell und beschreibendem Modell, wie es etwa bei LISREL geschieht. Das Meßmodell kann dabei bedeutend einfacher gehalten werden, und bekannte Meßmodelle können als modularer Baustein immer wieder verwendet werden. Da allerdings die beiden Modellteile nicht voneinander unabhängig sind, treten trotz alledem Schwierigkeiten auf ("Fehlerfortpflanzung").

Eine weitere Möglichkeit besteht in einer Änderung des Wahrscheinlichkeitsbegriffes. Dem Fehler- wie dem Umfragemodell entspricht die sogenannte Häufigkeitsinterpretation der Wahrscheinlichkeit (Wahrscheinlichkeit als Grenzwert einer Folge von relativen Häufigkeiten). Mehr Messungen ergeben einen genaueren Wert, ebenso unter gleichbleibenden Bedingungen wiederholte Umfragen (Mittelwerte von Mittelwerten geben bessere Ergebnisse; "biasfreie Schätzungen"). Die Schwierigkeiten mit diesem Begriff sind seit langem bekannt, und verschiedene Lösungsversuche wurden vorgeschlagen (STEGMÜLLER 1973). Zumeist läuft das auf den Begriff der "subjektiven Wahrscheinlichkeit" hinaus, in der Keynesschen Definition "the degree of rational belief" (KEYNES 1962). Praktisch bleibt aber die Bestimmung dieser subjektiven Wahrscheinlichkeiten vage.

Unvermeidbar ist eine bis zu einem gewissen Grad willkürliche, wenngleich wohlüberlegte und genaue Festlegung (Operationalisierung) der Begriffe mit all ihren bekannten Schwierigkeiten, auch im Falle einer beschreibenden Statistik. Für eine Anwendung statistischer Methoden ist eine präzise Operationalisierung (und damit Konstruktion der Population) unabdingbar, will man nicht jeden Gewinn an Exaktheit und Sicherheit in sein Gegenteil verkehren. Gerade die Modellmethode impliziert eine solche Konstruktion.

Da die Voraussetzungen nicht logisch bewiesen oder empirisch verifiziert werden können, bleibt wie sonstwo in der Wissenschaft nur ein pragmatisches Kriterium übrig, nämlich das der Bewährung, wozu mindestens Verträglichkeit mit der empirisch gefaßten Wirklichkeit gehört. Die Fehler- und Ausgleichsrechnung hat sich in weiten Bereichen der Naturwissenschaft und Technik bewährt und ist der Ausgangspunkt für zahlreiche statistische Verfahren auch in den Sozial- und Wirtschaftswissenschaften geworden. In der Mathematik hat Felix Klein (KLEIN 1928), einer der bedeutendsten Mathematiker, die Analysis (und damit die Wahrscheinlichkeitsrechnung) nicht umsonst immer "Approximationsmathematik" genannt, und in philosophischer Überhöhung hat der zu Unrecht heute kaum bekannte Hans Vaihinger seine Philosophie der Fiktion entwickelt (VAIHINGER 1911), die auch den Kern der Statistik trifft.

9 Systemtheorie

Das Wort "System" leitet sich vom griechischen "τὸ σύστημα" her, was soviel wie "das Zusammengestellte, das Geordnete" bedeutet. Es weist damit schon auf den Kern des Systembegriffs und verwandter Begriffe hin, nämlich die Ganzheit, Strukturiertheit und Abgegrenztheit (Konturiertheit). Von der biologischen Seite - die Biologen zählen zu den nachdrücklichsten Vertretern der Systemtheorie - kommt noch der Aspekt der Wechselwirkung mit der Umgebung hinzu. Für den Historiker kann ein System die Gesamtheit aller dem Oberbegriff Kultur unterzuordnende Phänomene umfassen, es kann sich um einen Teilbereich wie Wirtschaft oder Recht handeln oder wie in der Archäologie um sämtliche an einer Siedlungsstätte anzutreffende Phänomene.

Die klassischen mathematischen Methoden der Systemtheorie sind allerdings an der Physik orientiert und gründen zumeist auf Differentialgleichungssystemen. Historisches Material erfüllt die Voraussetzungen dafür nicht oder kaum. Systemtheorie dient dann ausschließlich, um gewisse qualitative Beziehungen modellhaft nachzuvollziehen ("Systemdenken"). So könnten geringfügige genetische Änderungen von Gräsern prähistorische Menschen veranlaßt haben, mehr Gräser dieser Art einzusammeln und sie schließlich anzubauen. Dies führte im Laufe der Zeit zur Züchtung von Getreidesorten mit noch höheren Erträgen, zu Bevölkerungswachstum, abermals intensivierter Landwirtschaft usw. Bei der Aufstellung und Ausarbeitung solcher Gedanken wirken Konzepte aus der Systemtheorie als Leitlinie (wie im Beispiel oben Rückkopplung, Wechselwirkung von System und Umwelt und dergleichen mehr).

Es existieren aber auch mathematische Modelle, die das Systemdenken nicht nur ganz allgemein und vage, sondern recht präzise anzuwenden gestatten und doch nicht die Datenlage für kontinuierliche Systeme voraussetzen. Dazu zählen zunächst die Theorie der formalen Sprachen, Automatentheorie, Boolesche Funktionen, dann Differenzengleichungssysteme, die bereits sprunghafte Änderungen innerhalb eines gleichmäßig ablaufenden Prozesses zu modellieren gestatten.

Ein anderer Weg, um die fehlenden oder unzureichenden Daten für eine Systembetrachtung zu ersetzen, ist die Computersimulation. Sie ermöglicht die Untersuchung des Verhaltens von Kultursystemen unter dem Einfluß zeitbedingter wie auch zeitunabhängiger Faktoren. Typische Fragestellungen für eine Simulation sind: Verbreitung von Handelsgütern, Sprachen und dergleichen (Diffusionsmodelle); Auswirkungen von Veränderungen in der Umwelt auf Bevölkerungszahl, Nahrungsbeschaffung, Siedlungsmuster; die Entwicklung von Siedlungssystemen bei unterschiedlichem Bevölkerungswachstum und unter sich ändernden wirtschaftlichen, technologischen und ökologischen Bedingungen. Treffend läßt sich die Simulation als "computergestütztes Gedankenexperiment" charakterisieren. Die prinzipiellen Vorzüge und Mängel der Methode sind dann vom Gedankenexperiment abzulesen, nur daß eine Leistungssteigerung durch den Rechner eintritt.

10 Automatentheorie

10. 1 Automatentheorie als historische Metatheorie

Die Automatentheorie ist eine Metatheorie von Input-Output-Systemen mit Rückkopplung. Eine Metatheorie hat als Ziel eine Verallgemeinerung der Begriffe und Aussagen spezieller Theorien. Sie vereinigt mehrere bislang getrennte Theorien und sucht dadurch ein effizienteres Werkzeug für den Forscher zu liefern. Das grundlegende Denkschema entspricht dabei vollkommen dem wissenschaftlichen Alltagsdenken: Etwas wirkt ein ("Eingabe"), es entstehen Ergebnisse ("Ausgabe"), und dieses Wirken ist durch allgemeine Bedingungen ("Zustände") bestimmt. Diese Bedingungen werden durch die Einwirkungen verändert und das Ergebnis beeinflußt die ursprünglichen Einwirkungen (Rückkopplung).

In der Geschichtswissenschaft läßt sich häufig "Staat" als System auffassen. Die Zustände beschreiben dann das Staatswesen (z. B. Staatsgebiet, Bevölkerung, Wirtschaftslage, oder auch nur gute bzw. schlechte Lage). Einwirkungen (Einflüsse) können innere (politische Umschichtungen, Wahlen, ...) wie auch äußere (Politik anderer Staaten) sein. Auswirkungen sind beispielsweise das innen- wie außenpolitische Geschehen, das naturgemäß die Zustände des Staates (z. B. sein politisches System) wie auch die Einwirkungen (Außenpolitik und dergleichen) beeinflussen.

Daß das Grundschema der Automatentheorie realitätsgerecht ist, ist unzweifelhaft. Manche historische Darstellungen (vgl. PING 1976) lesen sich wie Übungsbücher zum automatentheoretischen Modellbau. Es fragt sich allein, ob die Einzelheiten der Theorie über das Grundlegende hinaus sich als nützlich erweisen oder nur eine scheinbare Wissenschaftlichkeit bringen. Die Antwort ist nicht ganz einfach. Sicherlich wird die übliche verbale Geschichtsschreibung nicht überflüssig. Wenn jedoch eine große Zahl von Einzelfakten berücksichtigt werden muß, entgleitet leicht die Übersicht. Simulationsmodelle erfordern das genaue Einhalten eines festen Schemas: In beiden Fällen lohnt die Formalisierung auch von qualitativen Sachverhalten. Unumgänglich wird die Formalisierung bei umfassenderen quantitativen Modellen, allerdings beschränkt die historische Datenlage solche Modelle wohl auf einen recht kleinen Zeitraum jüngerer Geschichte. Wieweit spezielle Begriffsbildungen wie Minimalautomat, Äquivalenz von Automaten und ähnliches sich als fruchtbar erweisen, hängt nicht zuletzt daran, ob die Historiker bereit sind, solche Begriffsbildungen in ihr Denken aufzunehmen.

10.2 Formale Definitionen

Morphismen (Abbildungen von Strukturen) beziehen zwei Systeme aufeinander (z.B. zwei Staaten):

$$A(X,Y,Z,\delta,\mu) \rightarrow A^*(X^*,Y^*,Z^*,\delta^*,\mu^*),$$

A System; X, Y, Z Mengen; δ, μ Abbildungen;
* bezeichnet die entsprechenden Größen im Bildbereich.

Halbautomaten sind Tripel $(X,Z;\delta)$ mit nichtleerem X, Z, und der Abbildung

$$\delta: X \times Z \rightarrow Z$$

(Entsprechend der Eingabe und dem zuvor herrschenden Zustand folgt der neue Zustand des Systems).

Automaten sind Quintupel (X,Y,Z,δ,μ) über einem nichtleeren Eingangsalphabet X, einem Ausgangsalphabet Y, einer Menge von Zuständen Z, und zwei Abbildungen

$$\delta: X \times Z \rightarrow Z,$$
$$\mu: X \times Z \rightarrow Y$$

(Je nach der Eingabe und dem Zustand erfolgen die Zustandsänderung und die Ausgabe).

Praktisch werden Automaten häufig durch zeitabhängige Differenzen- oder Differentialgleichungen dargestellt:

$$y(t) = f[x(t),z(t)],$$
$$z(t+1) = g[x(t),z(t)].$$

Der Arbeitsökonomie und der Durchschaubarkeit der Modelle wegen sucht man nicht wesentlich verschiedene ("äquivalente") Zustände auszuscheiden:

Äquivalente' Zustände $z \equiv z^*$ sind solche, für die gilt:

$$\delta(z,x_1,...x_n) = \delta^*(z^*,x_1,...x_n)$$

für alle Folgen $(x_1,...x_n) \varepsilon F_x$

(Äquivalente Zustände führen bei gleicher Eingabe zur gleichen Ausgabe).

Äquivalente Automaten $A(X,Y,Z,\delta,\mu)$, $A^*(X^*,Y^*,Z^*,\delta^*,\mu^*)$ sind charakterisiert durch die Bedingungen:

Für alle z gibt es ein z*, so daß $z \equiv z^*$,
und für alle z* gibt es ein z, so daß $z \equiv z^*$

(Zu jedem Zustand eines Automaten findet man einen äquivalenten Zustand im jeweils anderen Automaten).

Ein Minimalautomat ist ein Automat ohne äquivalente Zustände:

$$z \equiv z^* \rightarrow z = z^*.$$

10.3 Stochastische Automaten

Im allgemeinen ist das Material, auf Grund dessen der Automat bestimmt werden soll, unvollständig. Das heißt, die Abbildungen eines Automaten liefern bei einer Eingabe die Resultate nur mehr mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit. Dies berücksichtigt der Begriff des stochastischen Automaten.

$A = (X,Y,Z;p)$ heißt stochastischer Automat, wenn gilt:

(1) X, Y, Z sind nichtleere Mengen,
X Eingabealphabet,
Y Ausgabealphabet,
Z Zustandsmenge.

(2) Für alle $x \in X$, für alle $z \in Z$:
$p(.,. \mid x,z)$ ist ein bedingtes Wahrscheinlichkeitsmaß auf $Y \times Z$.

Dazu kommen entsprechende rekursive Definitionen der Fortsetzung von p auf die freien Monoide von X und Y, um eine sequentielle und synchrone Arbeitsweise zu beschreiben.

Diese Art von Automaten führt zwangsläufig auf Probleme der Parameterschätzung, da die den Halbautomaten oder Automaten kennzeichnenden Größen im allgemeinen aus Beobachtungen, die Realisierungen eines stochastischen Prozesses darstellen, bestimmt werden. Zahlreiche statistische Methoden sind zweckdienlich: Anpassung von Wahrscheinlichkeitsverteilungen, Analyse latenter Strukturen im Sinne von Lazarsfeld, das Rasch-Modell, Beschreibung stochastischer Automaten durch Regressionsgleichungen mit stochastischen Koeffizienten. Automatentheoretische Sätze lassen sich dabei unter anderem ähnlich wie die Faktorenanalyse zur Reduktion auf eine geringere Zahl von Variablen verwenden. Aussagen über Gleichheit, Äquivalenz usf. von Automaten führen zur Prüfung von für gewöhnlich multivariaten statistischen Hypothesen.

10.4 Regressionsmodell mit Zufallskoeffizienten

Die Anpassung von Verteilungen ist oftmals mit vielen Problemen behaftet. Es erscheint daher empfehlenswert, einen sequentiellen stochastischen Automaten über Regressionsmodelle mit Zufallskoeffizienten zu definieren:

$$y_t = \Sigma_k z_{tk}(\beta_k + v_{tk}),$$
$$1 \leq t \leq T,\ 1 \leq k \leq K,\ v_{tk} \text{ Zufallsvariable.}$$

Im einfachsten Fall ergibt sich das klassische Regressionsmodell

$y_t = z_t\beta + u_t$,
$Eu_t = 0$, $Eu_t u_{t+k}$ = Diagonalmatrix,
E Erwartungswert bezüglich t, k Lag.

Der allgemeine Fall ist heikler; Schätzverfahren sind z. B. bekannt für:

$Ev_{tk} = 0$, $Ev_{tk}^2 = \alpha_k$ (unbekannt),
$Ev_{tk}v_{sj} = 0$ für $t \neq s$ und $k \neq j$,
E Erwartungswert bezüglich t bzw. t und s.

Es läßt sich eine Vielzahl von Schätzverfahren auf das Modell anwenden. Als Beispiel diene die Methode des Maximum Likelihood:
Maximiere die Likelihoodfunktion

$$L = -\tfrac{1}{2}\Sigma_t \ln(\Sigma_t z_{tk}^2\alpha_k)$$
$$-\tfrac{1}{2}\Sigma_t (y_t - \Sigma_k z_{tk}\beta_k)^2/\Sigma_k z_{tk}^2\alpha_k,$$

v_{tk} verteilt nach $N(0,\alpha_k)$.

Unter anderem wurden verschiedene Varianten der Methode der Kleinsten Fehlerquadrate, das Verfahren nach Theil - Mennes (iteratives Verfahren mit einem Wechsel zwischen den v_{tk} und der Diagonale der Kovarianzmatrix der Residuen), Minimum Norm Quadratic Unbiased Estimation (MINQUE) vorgeschlagen (SWAMY 1970, FROEHLICH 1973). Viele Fragen sind noch offen geblieben, wie der Übersichtsartikel CHOW 1987 zeigt, wo sich weitere Literaturhinweise finden.

Zur Durchführung der Parameterschätzungen stehen ökonometrische Softwarepakete zur Verfügung, u. a. TSP oder RATS, sofern man nicht eine eigene Programmierung (etwa in GAUSS) vorzieht.

11 Entscheidungstabellen

Entscheidungstabellen sind endliche Input-Output-Systeme und im Gegensatz zu Automaten ohne Zustände und ohne Rückkopplung. Da sie endlich sind, können sie in Tabellenform dargestellt werden. Sie sind gut geeignet, Wenn-Dann-Beziehungen wie Verhaltensregeln oder Gesetzmäßigkeiten darzustellen.

Nehmen wir als Beispiel die Regeln für die Staatskunst, wie sie der Erste Minister Guan Xing des Herzogtums Xi im 7. Jahrhundert formuliert hat. Dort finden sich Regeln wie:

Nur wenn Kleidung und Ernährung angemessen sind, können die Menschen Stolz und Scham empfinden.

Not liefert eine Entschuldigung für Verrat.

Dazu läßt sich leicht eine Tabelle aufstellen:

Guan Xings Regeln der Staatskunst

Bedingungen	**Regeln** 1	2	3	4
Kleidung angemessen	J	J	N	N
Ernährung angemessen	J	N	J	N
Stolz und Scham	*		*	
Verrat		*		*
Handlungen				

Mathematisch gesehen ist eine Entscheidungstabelle (decision table) im allgemeinsten Sinne eine tabellarische Darstellung einer Abbildung Φ einer endlichen Menge B (card B = N) von endlichen geordneten Mengen fester Kardinalzahl n in eine endliche Menge H (card H = M) von endlichen geordneten Mengen der gleichen oder einer anderen Kardinalzahl m. Die Elemente der geordneten Mengen gehören wiederum festen endlichen Mengen X und Y an, die eine algebraische Struktur tragen können.

$$\Phi: B \rightarrow H$$
$$B = \{(x_1^1 \ldots x_n^1), (x_1^2 \ldots x_n^2), \ldots\}, x_i^k \in X, \text{card } B = N,$$
$$H = \{(y_1^1 \ldots y_m^1), (y_1^2 \ldots y_m^2), \ldots\}, y_j^l \in Y, \text{card } H = M,$$
$$x_i^k \in X, y_j^l \in Y, \text{card } X \text{ und card } Y \text{ endlich.}$$

Für gewöhnlich schränkt man die Mengensysteme wie auch die Abbildung stark ein. Der einfachste Fall ist die klassische Entscheidungstabelle mit den Bedingungen

$$X = Y \in \{0,1\},$$
X, Y Galoisfelder der Charakteristik 2.

Die Abbildung ist eine Abbildung "auf" und nicht "in" ("Boolesche Funktionen"). Die Urbildmenge B wird als Menge der Bedingungen (conditions), die Bildmenge H als Menge der Handlungen (actions) gedeutet. Dann sind die zwei standardmäßigen Darstellungen die obenstehende Tabelle und ihre Spiegelung (Vertauschung von Zeilen und Spalten). Durch Wiederholung der Elemente von H wird eine Gleichmächtigkeit von B und H erzielt (card B = card H).

Zwei solche Abbildungen Φ, Ω lassen sich zu einer dritten (Γ) zusammensetzen (Verknüpfung zweier Abbildungen):

$$\Gamma = \Omega \cdot \Phi.$$

Die Darstellung dieser Verknüpfungen kann wiederum in Tabellenform erfolgen; man spricht dann von Gitternetzen (oder nur von Gittern oder Netzen, grid charts). Eine graphische Darstellung sprengt allerdings rasch die normalen Papierformate und wird recht unübersichtlich.

Die Abbildungen und ihre Verknüpfungen lassen sich auch in Form von Graphen darstellen, bei gößeren Systemen wird aber auch diese Form bald unbrauchbar.

Es liegt daher nahe, für größere und komplexere Probleme Computer einzusetzen. Es existiert dafür eine ausgefeilte und bequem zu benutzende Software, und für besondere Fälle läßt sich leicht in einer höheren Programmiersprache wie C oder Pascal ein effizientes Programm schreiben. Auch Kalkulationsprogramme (wie Boeing Calc oder die Version 3.x von Lotus 1-2-3 mit ihren dreidimensionalen Tabellen, PlanPerfect und andere Pakete, die eine Verbindung von Tabellen zulassen) sind recht nützlich.

12 Dynamische Modelle

Daß Geschichte mit zeitlichem Wandel zusammenhängt, ist trivial. Dennoch ist die statistische Untersuchung historischer Prozesse bei weitem nicht ihrer Bedeutung nach entwickelt. Am ehesten finden sich Verfahren zur Beschreibung stetiger Entwicklungsprozesse wie z.B. die Zeitreihenanalyse. Das bewußte statistische Modellieren findet sich allerdings allenfalls bis zu dem Punkt, daß die zum Funktionieren des statistischen Verfahrens notwendigen Voraussetzungen berücksichtigt werden. Inhaltliche Überlegungen müßten weitaus stärker bei der Aufstellung mathematischer Modelle einbezogen werden.

Eine deterministische Prozeßbeschreibung erfolgt am einfachsten durch ein Gleichungssystem. Die Erklärung von Prozessen erfolgt zumeist besser, wenn die Änderung explizit in das Modell einbezogen und erst nachträglich eine Lösung des Systems von Funktionalgleichungen gesucht wird. Da die Physik das große Vorbild für eine Mathematisierung darstellt, werden häufig Differentialgleichungen zur Beschreibung von Prozessen verwendet. In den Humanwissenschaften fallen die Daten jedoch zumeist in festen Zeitabständen an, weswegen Differenzengleichungen explizit und nicht nur im Zuge des numerischen Verfahrens zur Approximation verwendet werden.

Man kann in Analogie zu den Differentialgleichungen von den (endlichen) Änderungen ausgehen und z.B. schreiben:

$\Delta w = f(t)\, \Delta t$,
w Feldgröße, t Zeit,
Δ Änderungsoperator (Differenzenoperator),
f(t) zeitabhängiger Faktor, der die mit der zeitlichen Änderung Δt
sich ergebenden Änderung Δw der Feldgröße bestimmt.

Eine andere Denk- und Schreibweise ersetzt Δw usf. durch die Differenz $w(t) - w(t-1)$ und nimmt die Zeiteinheiten konstant (meist gleich eins) an:

$$w(t) - w(t-1) - f(t) = 0,$$

oder bei Verwendung von Indizes statt der Funktionsschreibweise,

$$w_t - w_{t-1} - f_t = 0.$$

Man betrachtet die entsprechenden Größen zu einem bestimmten Zeitpunkt, eine Zeiteinheit davor, eine zweite Zeiteinheit davor usw. Dieser Ansatz wird im allgemeinen vorgezogen, sofern man nicht bewußt die Anlehnung an Differentialgleichungen sucht.

Dieser Ansatz ist einfach und einleuchtend, führt aber nichtsdestotrotz zu erheblichen mathematischen Problemen, da lediglich für lineare Differenzengleichungen mit konstanten Koeffizienten allgemeine Lösungsverfahren bekannt sind und in den übrigen Fällen gesonderte Untersuchungen erforderlich sind.

Schon folgendes Modell führt auf eine nichtlineare Differenzengleichung (die Werte der Feldgröße zu verschiedenen Zeitpunkten treten nicht nur in der nullten oder ersten Potenz auf):

Die Feldgröße wächst kontinuierlich mit der Zeit, doch nähert sie sich einem Grenzwert, so verlangsamt sich das Wachstum und verschwindet schließlich bei Erreichen des Grenzwertes.

$$b.(w_t - w_{t-1}) - a.w_t.(b-w_t) = 0,$$
b Grenzwert, a Maßstabskonstante.

Erst recht aufwendig werden Lagmodelle. Entsprechend der Lagdifferentialgleichung (wo die Modellvorstellungen noch am deutlichsten zu sehen sind)

$$dw(t)/dt = (a/b).w(t-t_1).[b - w(t-t_2)]$$

läßt sich eine Differenzengleichung aufstellen:

$$[w(t) - w(t-l)] - (a/b).w(t-t_1).[b - w(t-t_2)] = 0,$$
t_1 unter günstigen Umständen bis zum Wachstum verstreichende Zeit,
t_2 Zeit, die zur Anpassung der Änderungsraten bei sich ändernden Bedingungen (Gewichtung!) verstreicht,
a, b wie oben.

Bei vielen Anwendungen werden mehrere Variablen und somit Gleichungssysteme betrachtet, was die Modelle natürlich nicht einfacher macht.

In diesen Modellen treten Parameter auf, die erst aus empirischem Material bestimmt werden müssen. Die klassische Ökonometrie hat dieses Problem bearbeitet, zuerst die linearen Modelle, in letzter Zeit besonders auch die nichtlinearen. Will man die Funktionalgleichungen lösen, um zu einem geschlossenen Ausdruck zu gelangen, so trifft man auf stochastische Funktionalgleichungen, und die Lösungen sind ebenso wie die Parameter Zufallsgrößen. Die Standardaufgabe, die Verteilungen der Lösungen aus den Verteilungen der Variablen zu bestimmen, ist recht kompliziert und oftmals gar nicht oder nur über Näherungen gelöst.

Bei nichtlinearen Differenzengleichungen und Differentialgleichungen tritt ein völlig neues Problem auf. Der lineare Zusammenhang heißt im Kern: Es geht immer so weiter wie bisher. Lineare Funktionalgleichungen haben zwar zumeist nichtlineare Lösungen, aber wenigstens ist die Änderung gleichmäßig, ohne plötzliche Sprünge. Und genau diese Garantie der Gleichmäßigkeit geht bei nichtlinearen Funktionalgleichungen verloren. Sie spielen aber in den heutigen Natur- und Geisteswissenschaften eine herausragende Rolle, weswegen ihnen ein eigener Abschnitt gewidmet sei.

13 Katastrophentheorie

Seit Menschengedenken finden sich Berichte über plötzliche, zumeist als zerstörerisch angesehene Veränderungen im Leben der Menschen. Aus vorgeschichtlicher Zeit sind Mythen und Sagen überliefert, das Alte Reich der Mayas wurde in der Mitte des 10. nachchristlichen Jahrhunderts aufgegeben, in der Antike finden sich Abhandlungen wie Platos Dialoge (vor allem Kritias mit der Atlantissage), um das Jahr Tausend sorgte ein angeblich bevorstehender Weltuntergang für Aufregung, und in der neuesten Zeit schreiben Autoren wie Däniken und Tons Brunés über (diesmal eher segensreiche) vergangene plötzliche Ereignisse, oder unsere Jugend ist voll Angst vor dem atomaren Weltuntergang. Demgegenüber weist die Wissenschaft erstaunliche Zurückhaltung auf. "Natura non facit saltus" galt auch bis vor kurzem in Physik oder Biologie, die Nationalökonomie bevorzugte Gleichgewichtsmodelle nach dem Vorbilde Walras' oder allenfalls Wachstumsmodelle nach Tinbergen und Nachfolger. In der Geschichtsforschung, zumal in der Urgeschichtsforschung, konnte man den Untergang ganzer Völker und Kulturen (Mykene, Mohendscho Daro, Mayas) in verhältnismäßig kurzer Zeit nicht übersehen. Waren bei den Urvätern der modernen Vorgeschichtsforschung im 18. und 19. Jahrhundert noch Katastrophen, die mit dem Untergang aller Lebewesen einhergingen, in Mode, so folgte bald ein strenger Aktualismus, der auch vergangene Veränderungen der Erdoberfläche und des Lebens auf ihr aus heute genauso ablaufenden natürlichen Prozessen zu erklären suchte, und möglichst nicht aus einer gleichmäßigen Entwicklung herausfallen wollte (vergleiche z. B. das Vorgehen der "prozessualen Archäologie", BINFORD 1963). Wie wir im weiteren sehen werden (mathematische Katastrophentheorie), schließen sich die beiden Ansätze nicht nur nicht aus, sondern bilden sogar eine Einheit.

Gehen wir zunächst aus von der archäologischen Methode der magnetischen Sondierung, wo bestimmte Objekte wie z. B. Herde und Brennöfen, gewisse Elemente von Siedlungsanlagen wie Gräben oder Gegenstände aus Eisen lokale Störungen des Magnetfeldes hervorrufen. Ein einfacheres Differentialgleichungssystem, das den magnetischen Feldgleichungen ähnlich ist, wurde von RÖSSLER (1976) studiert und sei zur Demonstration der methodischen Probleme hier skizziert.

Das Differentialgleichungssystem sei in folgender Form gegeben:

$$dx/dt = -(y + z),$$
$$dy/dt = x + ay,$$
$$dz/dt = b + z(x - c),$$

x, y, z Komponenten der magnetischen Feldstärke,
a, b, c Konstanten.

In diesem System sind die beiden ersten Gleichungen linear, in der dritten Gleichung ist ein Glied zweiter Ordnung enthalten. Wählen wir a und b fest und variieren wir c (Bifurkationsparameter, die für die sprunghaften Änderungen verantwortliche Systemgröße). In einem gewissen Bereich des Parameters c können kleine Änderungen ein völlig verschiedenes Verhalten der Lösungen hervorrufen. Angenommen, c sei eine Materialkonstante, die z. B. für das umgebende Erdreich und den Kessel aus Eisen verschieden ist. Bei einer stetigen Lösungskurve müssen die Materialkonstanten stark voneinander abweichen, um eine größere Änderung in der magnetischen Feldstärke zu erzielen, und die Methode versagt bei Substanzen mit etwa gleichen Materialkonstanten. Demgegenüber würde aber gerade in diesem Fall eine instabile Lösung des Gleichungssystems ein brauchbares Verfahren garantieren und trotz der kleinen Unterschiede in den Materialkonstanten ein deutlich verschiedenes Bild der magnetischen Feldlinien ergeben.

An dem Beispiel wird Verschiedenes deutlich. Zunächst fällt die Komplexität der Eigenschaften der Lösungen bei schon ganz einfachen Systemen auf (Einfach heißt dabei einfacher funktionaler Zusammenhang und wenige Variable, kaum je mehr als drei oder vier). Dann wie natürlich beide, kontinuierliche wie sprunghafte, Veränderungen auftreten. Es mutet eher wie eine unerklärliche Blindheit an, daß seit Newton in der Physik fast ausschließlich stetige Lösungen und Gleichgewichtszustände gesucht wurden und es eine Sache der letzten Jahrzehnte ist, gerade unstetige Lösungen und Zustände fern vom Gleichgewicht zu untersuchen. Letztlich, woher kommt die Kenntnis der Parameter? In der Tat gibt es so gut wie keine passende statistische Theorie. Wohl existieren zahlreiche Verfahren zur Parameterschätzung in nichtlinearen Modellen (ein moderner Forschungsschwerpunkt der Ökonometrie), allein die Stichprobenverteilungen der geschätzten Parameter sind unbekannt oder wenigstens aus den vorhandenen Daten schlecht oder gar nicht zu bestimmen. Aber hat eine Statistik, die auf einer beliebigen Wiederholbarkeit ("in the long run") beruht, überhaupt einen Sinn bei einmaligen und plötzlich auftretenden Ereignissen? Zumindest muß wohl eine Uminterpretation des Wahrscheinlichkeitsbegriffs stattfinden (vgl. Abschnitt 8).

Die Katastrophentheorie im engeren Sinne wurde von René Thom (vgl. THOM 1972; eine gute Einführung bei ARNOLD 1986) entwickelt. Sie ist eine Art qualitativer Theorie spezieller Differentialgleichungssysteme (sogenannter Gradientensysteme):

$dx(t)/dt = -\ \mathrm{grad}\ V(x(t);u(t);t)$,

t Zeit, **x** Zustandsvariablen, **u** Eingabevariablen,

V Potentialfunktion,

$f_i = \mathrm{grad}\ V = \partial V/\partial x_i$,

$\mathrm{rot}\ \mathrm{grad}\ V = \partial f_i/\partial x_j - \partial f_j/\partial x_i$.

Dieser Ansatz entspringt dem klassischen Grundkonzept dynamischer Systeme (Zustände, Input, Veränderung der Zustände als Output) und ist mathematisch halbwegs einfach zu handhaben (Vektordifferentialgleichung erster Ordnung und Existenz einer Potentialfunktion). Damit eine Potentialfunktion existiert, muß

$\mathrm{rot}\ \mathrm{grad}\ V = 0$

sein (das Feld muß wirbelfrei sein, wie die Physiker sagen), eine recht spezielle Annahme. Es überrascht, daß überhaupt noch ein praktisch genügend flexibles Modell herauskommt (z.B. Fokker-Planck-Gleichung für diffusionsartige Prozesse). Die Katastrophentheorie stützt sich im weiteren auf die Untersuchung der Potentialfunktion, die nicht nur mathematisch vorhanden, sondern auch realwissenschaftlich deutbar sein muß: Die Potentialfunktion verbindet zeitliche Änderungen der Zustandsgrößen mit Änderungen der Inputgrößen bezüglich der Zustandsgrößen. Gesucht werden nun die stationären Lösungen

$\mathrm{grad}\ V = 0$

(Maxima, Minima, Sattelpunkte). Minima führen auf stabile Zustände. Wenn zusätzlich die Hessesche Determinante (Determinante aus den zweiten Ableitungen der Potentialfunktion) verschwindet, ist das System nicht stabil: Bei kleinen Änderungen der Potentialfunktion ändern sich die Lösungen (Trajektorien) beträchtlich. Thom hat die "Katastrophen" für Systeme mit weniger als fünf Zustandsvariablen und bis auf Diffeomorphismen klassifiziert (die sieben elementaren Katastrophen).

Diese Modelle wurden vorwiegend in den Naturwissenschaften entwickelt (Physik, physikalische Chemie, Biologie), und es überrascht, daß sie eine solche Verbreitung gefunden haben. Das mag sich zum Teil aus dem Prestige der Naturwissenschaften erklären, vorwiegend dürften es die bisweilen nur dem Namen (Katastrophentheorie, Chaostheorie) nach vermuteten Ansätze zur Bewältigung gewaltsamer, oftmals zerstörerischer Prozesse sein. Manchmal fällt es in den Geisteswissenschaften schon schwer, unter den engen Voraussetzungen überhaupt sinnvolle Modelle zu entwickeln: Potentialfunktion (Existenz einer Art Generalfunktion, die alles erklärt); Beschränkung auf so wenige Variable; Meßniveau und hohe Meßgenauigkeit. Am leichtesten geht das, wo überhaupt naturwissenschaftliche Methoden (z.B. magnetische Sondierung bei Ausgrabungen) eingesetzt werden oder wenigstens Modelle nach naturwissenschaftlichen Vorbildern (Diffusion, Distribution) geschaffen wurden.

Der Hauptnutzen scheint jedoch gar nicht aus dem konkreten Einsatz dieser Modelle zu erwachsen, sondern aus allgemeinen Folgerungen. Ilya Prigogine (PRIGOGINE - STENGERS 1986) betont das Näherrücken von Geisteswissenschaften (er meint zumeist Geschichte) und Naturwissenschaften, diesmal sogar umgekehrt, die Physik entdeckt die Irreversibilität der Zeit, wie sie die Historiker seit eh und je kennen. Am bedeutsamsten scheint mir jedoch bisher zu sein, daß in den Geisteswissenschaften instabile, vom Gleichgewicht entfernte Prozesse modellhaft, aber mit aller Exaktheit der Mathematik studiert und diskutiert werden können. Die Einsichten in solche Prozesse mögen intuitiv gefunden worden sein, sie werden jetzt rational faßbar und damit auch eher lehr- und lernbar. Für den Statistiker stellen diese Modelle eine ungeheure Herausforderung dar, sich aufzumachen von der überflüssigen Vervielfachung statistischer Tests und Schätzverfahren zur Eroberung wahren Neulands.

14 Datenverarbeitungsaspekte

Kleine Modelle kann man mit Papier und Bleistift und allenfalls mit einem Taschenrechner (die besseren verfügen bereits über Statistik- und Numerikfunktionen, bisweilen finden sich sogar Matrizenrechnung und algebraische Umformungen) angehen. Für gewöhnlich ist jedoch der Einsatz eines größeren Rechners notwendig. Die Vielzahl der Benutzer verwendet für anspruchsvollere Modelle spezialisierte Programmpakete, die einzelne Verfahren oder Verfahrensklassen beinhalten wie z. B. PHASER (KOÇAK 1989) für nichtlineare Modelle. Im Idealfall erhält man zugleich eine KI-Unterstützung mitgeliefert wie etwa bei GLIMPSE, einer Fortentwicklung des Statistikpakets GLIM (Generalized Linear Models, verallgemeinerte lineare Modelle). Dieses Vorgehen ist zunächst sehr bequem und bringt rasch Erfolge, weist allerdings mehrere Nachteile auf. Bleibt man nicht bei einer Modellklasse, so muß man andauernd die Pakete wechseln, was kostspielig ist und das Erlernen immer neuer Systeme bedeutet. Es stehen auch nur bestimmte Verfahren zur Verfügung, und häufig besteht keine Kontrolle darüber, welche algorithmischen Details programmiert wurden oder wie die Rechnung abläuft.

Wer sich mehr mit der statistischen Modellierung beschäftigt, muß daher mindestens zur Ergänzung flexiblere Werkzeuge wählen. In Frage kommt zunächst die Programmierung in einer höheren Programmiersprache (heute am ehesten in C oder Pascal, allenfalls in Fortran) und die Verwendung fertiger Routinen (vor allem aus der Numerik). Als besonders bequem hat sich die Benutzung von statistischen oder numerischen Programmierumgebungen erwiesen. Unter UNIX ist dies S, gegebenenfalls unterstützt durch eine Sammlung von Numerikroutinen, unter MS-DOS oder IBM DOS hat GAUSS große Verbreitung gefunden. Im allgemeinen empfiehlt sich, eine Datenreduktion mit Hilfe eines der gängigen Pakete wie SPSS oder SAS vorzuschalten.

So kann man erfolgreich arbeiten, allein die ganze Zukunft ist das nicht, da letztlich recht altmodische Programmierkonzepte wie Datenfluß und logische Verzweigungen dahinterstehen. Das wohl zur Zeit aussichtsreichste Konzept ist das der "objektorientierten Programmierung" (OOPS, Object Oriented Programming System), wo die Programme "Botschaften" ("Messages") zwischen aktiven "Objekten" senden. Damit ist ein Zurückhalten von Information (Encapsulation, "Abfüllen in Kapseln") verbunden, das heißt, nicht jeder Benutzer verfügt über die gleiche Information bezüglich des Gesamtsystems. Das mag zunächst unverständlich oder trivial erscheinen; in Wirklichkeit ist die objektorientierte Programmierung sehr effizient und dem menschlichen Denken gut nachgebildet.

In der Archäologie könnten Objekte im Sinne von OOPS beispielsweise Objekte im Sinne der Archäologie sein, also Bauten, Kunstwerke, Strukturen (wieder im Sinne der Archäologie verstanden). Botschaften wären Beziehungen zwischen diesen Objekten, z.B. eine Zusammenfügung von Strukturen wie Abzugsrinnen, Brunnenschächten, Gräben, Mauern und Erdwällen, Herden, Brennöfen und dergleichen zu Gebäuden oder Siedlungen. Dabei wird dieselbe Botschaft "Gebäude" natürlich je nach dem einzelnen Objekt verschieden interpretiert. Objekte im Sinne von OOPS wären aber auch Einzelpersonen, die miteinander in Beziehung treten und historisch relevante Handlungen setzen. (Die Theorie des Symbolischen Interaktionismus stellt ein soziologisches Gegenstück zu OOPS dar.) Damit diese Objekte und Botschaften für mathematisches oder statistisches Modellieren verwendbar sind, müssen sie mathematisch oder statistisch relevante Information enthalten, von denen der Historiker vielleicht gar nicht zu erfahren braucht (Encapsulation). Beziehungen können wie Werkzeuge nicht nur als Botschaften, sondern auch als Objekte auftreten. Mathematische und statistische Verfahren wären dann solche Objekte.

OOPS ist weder alltägliche Wirklichkeit noch Utopie. Seit längerer Zeit gibt es das Konzept, das auch praktisch als Leitbild bei der Programmierung fungiert, aber auch eine Reihe von Programmpaketen und Programmiersprachen dazu. Der für den Historiker interessanteste Vertreter ist meines Erachtens SMALLTALK (bzw. SMALLTALK V), das sogar eine graphische Darstellung der Objekte beinhaltet. Hier werden aber auch die Probleme von OOPS deutlich: SMALLTALK und seine Varianten sind schwierig zu erlernen und langsam bei der Programmausführung. Es wartet hier noch sehr viel Arbeit, wie ich meine, aber auch eine ungeheure Chance.

LITERATUR

ARNOLD, V. I.: Catastrophe Theory. 2. Aufl., Berlin usf. 1986.

BARNET, V.: Comparative Statistical Inference. London - New York - Sydney - Toronto, 2. Aufl. 1982.

BEACH, E. F.: Economic Models. New York 1957.

BINFORD, L. R.: Archaelogical systematics and the study of cultural process. American Antiquity 31 (1 965) 203-210.

BOUDON, R.: L'analyse mathématique des faits sociaux. Paris 1967.

BRUGGER, W.: Philosophisches Wörterbuch. Freiburg, 19. Aufl. 1976.

CHAMPION, S.: A Dictionary of Terms and Techniques in Archaeology. Oxford 1980. Deutsche Ausgabe: DuMont's Lexikon archäologischer Fachbegriffe und Techniken. Köln 1982.

CHOW, G. C.: Random and Changing Coefficient Models. Z. Griliches und M. D. Intriligator (Hg.), Handbook of Econometrics. Bd. 2, Amsterdam usw. 1984, 1987.

CLARKE, D. I.: Analytical Archaeology. London 1968.

CLAUS, V.: Stochastische Automaten. Stuttgart 1971.

COLES, J.: Archaeology by Experiments. London 1973. Deutsche Ausgabe: Erlebte Steinzeit - experimentelle Archäologie. München - Gütersloh - Wien 1973.

FERGUS, R. M.: Decision Tables - What, Why and How. J. D. Couger und R. W. Knapp (Hg.), System Analysis Techniques. New York usw. 1974.

FROEHLICH, B. R.: Some Estimators for a Random Coefficient Regression Model. JASA 68(1973) 329-335.

GEBELEIN, H.: Zahl und Wirklichkeit. Quelle & Meyer, Leipzig 1943.

GORDESCH, J.: Causal Models. Colloquia Mathematica János Bolyai, 267 - 276. Budapest 1972.

GORDESCH, J.: Mathematik als Hilfswissenschaft in der Geschichte der Statistik und Staatsbeschreibung. M. Rassem und J. Stagl (Hg.), Statistik und Staatsbeschreibung in der Neuzeit. Paderborn usf. 1980.

GORDESCH, J.: A Sampling Procedure for Historical Data. H. Caussinus und P. Ettinger (Hg.), COMPSTAT 1982. Proceedings in Computational Statistics. Würzburg - Wien 1982, 242 - 248.

HARDTWIG, E.: Fehler- und Ausgleichsrechnung. BI Hochschultaschenbücher 262/262a, Mannheim - Wien - Zürich 1968.

HODDER, I., und C. ORTON: Spatial Analysis in Archaeology, 153-174. Cambridge 1976.

HOLDEN, A. V. (Hg.): Chaos. Manchester 1986.

KEYNES, J. M.: A Treatise on Probability. 7. Aufl., New York 1962.

KLEIN, F.: Elementarmathematik vom höheren Standpunkt aus. 3. Band: Präzisions- und Approximationsmathematik. 3. Aufl., Berlin 1928, Nachdruck 1968.

KOÇAK, H.: Differential and Difference Equations through Computer Experiments. 2. Aufl., New York - Heidelberg - Tokyo 1989.

MALINVAUD, E.: Pour une Axiomatique de la Causalité. H. O. A. Wold (Hg.): La Techniques des Modèles dans les Sciences Humaines. Monaco 1964.

MARDIA, K. V.: Families of Bivariate Distributions. London 1970.

MÜLLER, M., A. HALDER u. a. (Hg.): Kleines Philosophisches Wörterbuch. Freiburg im Breisgau 1971.

NICOLIS, G. und I. PRIGOGINE: Die Erforschung des Komplexen. Auf dem Weg zu einem neuen Verständnis der Naturwissenschaften. München 1987.

ORD, J. K.: Families of Frequency Distributions. London 1972.

PING, C., und D. BLOODWORTH: The Chinese Macchiavelli. 3000 Years of Chinese Statecraft. London 1976. Deutsche Ausgabe: Das chinesische Machtspiel. Dreitausend Jahre Staatskunst. Tübingen 1977.

PRIGOGINE, I. und I. STENGERS: Dialog mit der Natur. 5. Aufl., München - Zürich 1986.

RENNERT, P., H. SCHMIEDEL und C. WEISSMANTEL (Hg.): Kleine Enzyklopädie Physik. Leipzig, 2. Aufl. 1988.

RÖSSLER, O. E.: An Equation for Continuous Chaos. Phys. Lett. 57A(1976), 397 ff.

RULOFF, D.: Historische Sozialforschung. Stuttgart 1985.

STEGMÜLLER, W.: Personelle und Statistische Wahrscheinlichkeit. 1. und 2. Halbband, Berlin - Heidelberg - New York 1973.

STOLZ, F. - DEBRUNNER, A. - SCHMID, W. P.: Geschichte der lateinischen Sprache. Sammlung Göschen Bd. 492/492a, Berlin 1966.

SUPPES, P.: A Probabilistic Theory of Causality. Acta Philosophica Fennica 24, Amsterdam 1970.

SWAMY, P. A. V. B.: Efficient Inference in a Random Coefficient Regression Model. Econometrica 38(1970), 311 -323.

TINBERGEN, J. und H. C. BOS: Mathematical Models of Economic Growth. New York 1962.

THOM, R.: Stabilité Structurelle et Morphogénèse. Reading, Mass., 1972.

THOME, H.: Grundkurs Statistik für Historiker. Teil I. Deskriptive Statistik. Historical Social Research, Supplement No. 2 (1989). Teil II. Induktive Statistik und Regressionsanalyse. Historical Social Research, Supplement No. 3 (1990).

VAIHINGER, H.: Die Philosophie des Als-Ob. Seit 1876, 1. Aufl. 1911, 10. Aufl. 1927.

WEINBERGER, O.: Rechtslogik. Wien 1970.

WOLD, H. O.: Causality and Econometrics. Econometrica 16(1954).

WRIGHT, G. H. von: An Essay on Deontic Logic and the General Theory of Action. Acta Philosophica Fennica 21, Amsterdam 1968.